



Maquina de Corriente Continua

Aspectos constructivos

- Un sistema colector el cual está formado por delgas y escobillas, produce que el voltaje de salida de una máquina CC se encuentre rectificado, al aumentar la cantidad de delgas el voltaje de salida se rectifica aún más. Estas están hechas de carbón, grafito o una mezcla, con una conductividad alta para reducir las pérdidas eléctricas y bajo coeficiente de fricción para reducir el desgaste.
- El voltaje de salida de una máquina CC debido a la relación no lineal entre la corriente de excitación i_c y el campo magnético, no será una senoide perfecta.
- Existen dos devanados, siendo el primero el de armadura que es donde se induce el voltaje y se ubica en el rotor y el segundo es el de campo que se ubica en el estator, que son los responsables de generar el flujo magnético.
- Existen dos tipos de construcciones para los polos, achaflanada o excéntrica. Siendo la última con una forma más curva lo que permite distribuir mejor el flujo magnético de manera más uniforme.
- El conmutador se construye sobre el eje del rotor, y se encarga de invertir la polaridad de la corriente en la armadura, y está hecho sobre barras de cobre aisladas entre sí.

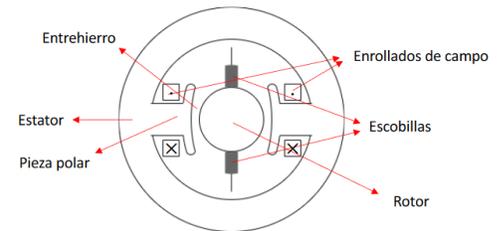


Figura 1: Diagrama del motor de corriente continua.

Modelo circuital

$$V_c = L_c \frac{di_c}{dt} + R_c i_c$$
$$V_a = E_a \pm L_a \frac{di_a}{dt} \pm R_a i_a$$
$$T_{\text{ind}} = \frac{E_a i_a}{\omega}$$
$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{\text{mec}} \pm T_{\text{ind}}$$

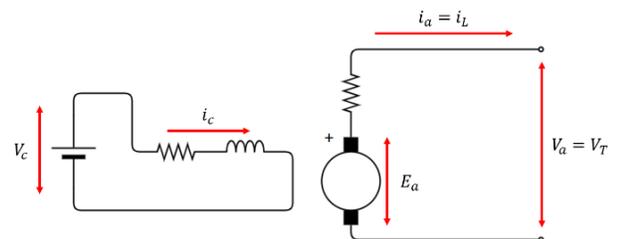


Figura 2: Modelo circuital para una máquina CC general.

- V_c, i_c son la tensión aplicada y la corriente entrando al circuito de campo.

- V_a, i_a son la tensión aplicada y la corriente entrando a la armadura.
- E_a es la fem generada en la armadura.
- T_{ind} es el torque electromagnético inducido en el rotor y ω es la velocidad de giro del rotor.
- J es el momento de inercia del rotor y las masas acopladas al eje.
- R_c, R_a, L_c y L_a son las resistencias e inductancias de campo y de armadura.

Ademas se tiene que para un solo campo:

$$E_a = K\phi\omega = G\omega i_c \quad (1)$$

$$T_{ind} = G i_c i_a \quad (2)$$

Donde k corresponde a una constante de diseño y G se denomina inductancia de rotacion, estos parametros no son constantes, pero se pueden considerar dentro de pequeños rangos de operacion.

- **Perdidas en el nucleo:** Producto de la histerisis y corrientes parasitas, las cuales aumentan con la densidad de flujo magnetico y la velocidad de operacion:
- **Perdidas mecanicas:** Debido a la friccion y el rozamiento con el aire, estas aumentan con la velocidad de operacion.
- **Perdidas en el cobre:** Se presentan en los devanados de campo y armadura de la maquina.

$$P_a = i_a^2 R_a \quad (\text{Pérdidas en la armadura}) \quad (3)$$

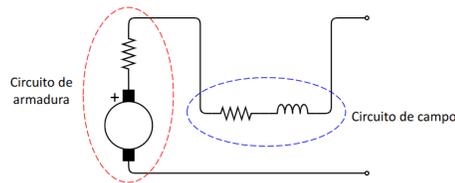
$$P_c = i_c^2 R_c \quad (\text{Pérdidas en el campo}) \quad (4)$$

Donde R_a y R_c son las resistencias de armadura y campo respectivamente.

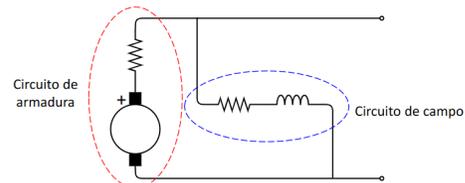
- **Perdidas por caida de tension en las escobillas:** Se produce debido al contacto entre las escobillas y el conmutador, estas aumentan con la corriente de armadura.

$$P_{Ce} = \Delta V_{Ce} i_a \quad (5)$$

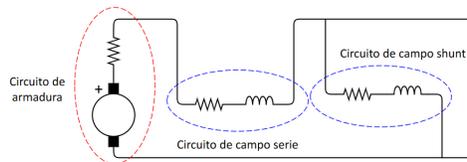
Donde ΔV_{Ce} es la caida de tension en las escobillas. Es posible el pasar de una configuracion de maquina CC de excitacion independiente a dos modelos circuitales equivalentes, dados por:



(a) Maquina CC de excitacion en serie



(b) Maquina CC de excitacion en Paralelo



(c) Maquina CC compuesta

Luego es posible caracterizar la eficiencia por:

$$\text{La eficiencia de cualquier máquina eléctrica: } \eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (6)$$

$$\text{Eficiencia generador } \eta = \frac{V_T i_L}{T_{\text{ap}} \omega} \quad (7)$$

$$\text{Eficiencia Motor } \eta = \frac{T_{\text{ap}} \omega}{V_T i_L} \quad (8)$$

$$\text{La regulación de voltaje generador: } \text{Reg} = \frac{V_0 - V_T}{V_T} \quad (9)$$

Donde V_0 es la tensión en bornes en vacío

Análisis en estado estacionario

Para analizar el desempeño de una máquina CC en cualquier tipo de conexión y operando como generador o motor, se tienen diversas curvas características, algunas de estas son:

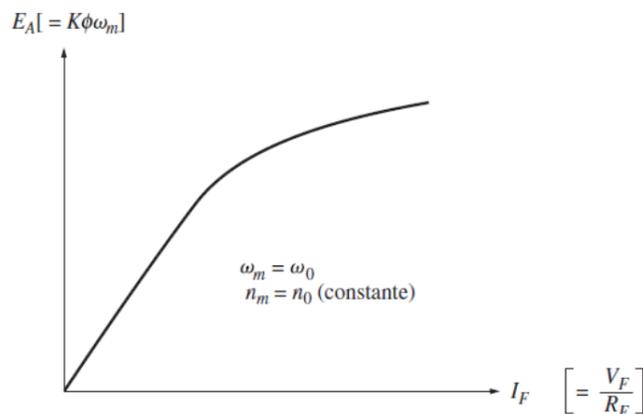


Figura 3: Ejemplo de una curva de máquina CC, en particular corresponde a una curva de magnetización, es interesante mencionar que tanto motores como generadores están diseñados para operar cerca del punto de operación, eso quiere decir que se requiere un gran incremento en la corriente de campo para un pequeño incremento en la tensión de salida.

- En el generador de excitación independiente el flujo de campo se deriva de una fuente de potencia separada e independiente del generador en sí mismo.
- En esta configuración si se desea controlar el voltaje en las terminales se puede hacer de dos maneras
 - Si se aumenta la velocidad de rotación ω entonces aumenta la tensión interna
 - Si se aumenta la corriente de campo i_c aumentará el flujo en la máquina y por lo tanto la tensión interna (*En la práctica se utiliza este método dado que variar la velocidad de rotación suele estar limitado*)

Se tienen las diferentes configuraciones de conexión para una máquina CC, las cuales son:

Generador CC en Derivación

$$\begin{aligned}
 V_c &= R_c i_c \\
 V_a &= E_a - R_a i_a \\
 E_a &= G \omega i_c \\
 T_{\text{ind}} &= \frac{E_a i_a}{\omega} = G i_c i_a \\
 T_{\text{mec}} - T_{\text{ind}} &= 0 \\
 V_T &= V_a = V_c \\
 i_a &= i_c + i_L
 \end{aligned}$$

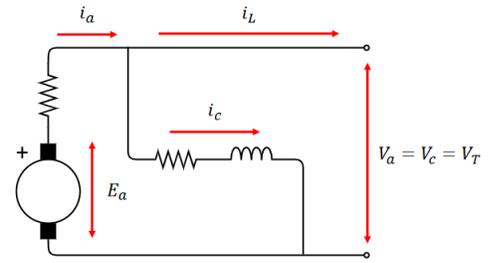


Figura 4: Diagrama del generador CC en derivación.

Generador CC en Serie

$$\begin{aligned}
 V_c &= R_c i_c \\
 V_a &= E_a - R_a i_a \\
 E_a &= G \omega i_c \\
 T_{\text{ind}} &= \frac{E_a i_a}{\omega} = G i_c i_a \\
 T_{\text{mec}} - T_{\text{ind}} &= 0 \\
 V_a &= V_c + V_T \\
 i_a &= i_c = i_L
 \end{aligned}$$

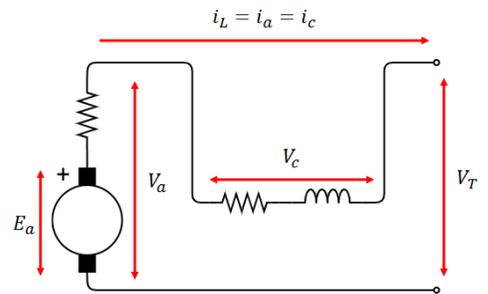


Figura 5: Diagrama del generador CC en serie.

Motor CC en derivacion

$$\begin{aligned}
 V_c &= R_c i_c \\
 V_a &= E_a + R_a i_a \\
 E_a &= G \omega i_c \\
 T_{\text{ind}} &= \frac{E_a i_a}{\omega} = G i_c i_a \\
 T_{\text{mec}} - T_{\text{ind}} &= 0 \\
 V_T &= V_a = V_c \\
 i_L &= i_a + i_c
 \end{aligned}$$

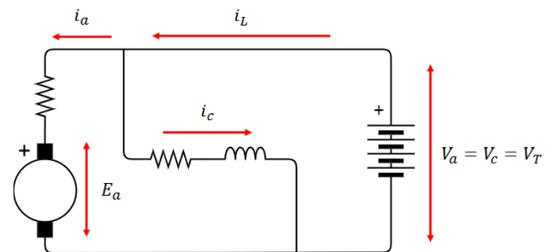


Figura 6: Diagrama del motor CC en serie

Motor CC en serie

$$V_a = V_c + V_T$$

$$i_a = i_c = i_L$$

$$V_c = R_c i_L$$

$$V_a = E_a - R_a i_L$$

$$E_a = G\omega i_L$$

$$T_{\text{ind}} = \frac{E_a i_L}{\omega} = G i_L^2$$

$$T_{\text{mec}} - T_{\text{ind}} = 0$$

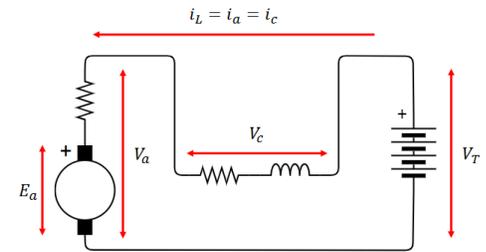


Figura 7: Motor CC en serie

Para controlar la velocidad de un motor CC en derivacion existen dos metodos:

- Ajustando la resistencia del circuito de campo , mediante una resistencia variable.
- Modificando la tension en las terminales aplicadas a los bornes de la maquina

Reaccion de armadura

Si se conecta una carga a los bornes de las escobillas, fluye una corriente que circula por la carga y por los devanados de la armadura, este flujo de corriente produce un campo magnetico propio el cual distorsiona el campo magnetico original, este fenomeno se conoce como reaccion de armadura, lo cual produce dos fenomenos dados por: (*Para entender de mejor manera este concepto recomiendo [este video](#)*)

- Desplazamiento del plano magnetico neutro
- Debilitamiento del campo

Para el primer caso es importante destacar que en caso de operar como generador el plano neutro se desplaza en el sentido de la rotación. Si esta máquina hubiera sido un motor, la corriente de armadura fluye en dirección opuesta y el plano se desplaza contra el sentido de rotación.

El problema con el desplazamiento del plano neutro es que el conmutador debe provocar un cortocircuito en los segmentos de las delgas justo en el instante en que el voltaje a través de ellos es nulo. Este problema es grave puesto que lleva a que la vida útil de las escobillas se reduzca de manera drástica, y a que se deterioren las delgas

Por otro lado el debilitamiento del campo se produce debido a la curva de magnetizacion y al hecho de que algunas zonas de la superficie polar, el flujo magnético del rotor se suma al flujo del campo principal, lo que provoca un ligero aumento en el flujo total en esas áreas. Este problema se encuentra presente tanto en generadores como en motores. En general se tiene que cuando disminuye el flujo de un motor se incrementa su velocidad. Pero el incrementar la velocidad de un motor aumenta su carga, lo que provoca un debilitamiento aún mayor del flujo.

Metodos de solucion

Existen algunos metodos para corregir el problema de la reaccion de armadura, algunos de estos son:

- **Desplazamiento de las escobillas:** El desplazamiento de las escobillas en un motor o generador se utiliza para alinearlas con el plano magnético neutro y reducir la generación de chispas, pero esta técnica presenta problemas: el plano neutro cambia con cada variación de carga y se invierte cuando la máquina cambia entre modos de motor y generador, lo que exige ajustes constantes. Además, aunque ayuda a controlar las chispas, este desplazamiento debilita el flujo magnético, afectando la eficiencia del equipo.

- **Polos de Conmutacion:** Se emplean polos de conmutación, ubicados entre los polos principales, que permiten reducir el voltaje en los conductores durante la conmutación, evitando chispas. Estos polos no afectan el flujo principal y sólo influyen en los conductores en el momento exacto de la conmutación. Al incrementarse la carga, el efecto del flujo de los interpolos se opone al desplazamiento del plano neutro, logrando una cancelación que mantiene el funcionamiento estable tanto en modo motor como generador.
- **Devanados de compensacion:** Los devanados de compensación se utilizan en motores de trabajo pesado para eliminar completamente la reacción de armadura y estabilizar el flujo de campo, evitando así el desplazamiento del plano neutro. Estos devanados se ubican en las caras de los polos y generan una fuerza magnetomotriz opuesta a la del rotor, neutralizando su efecto. Como resultado, el flujo en la máquina se mantiene constante independientemente de la carga, asegurando un rendimiento estable.

Ejemplos: Preguntas de contenido Maquinas CC

1. **Control Primavera 2023** Qué es la reacción de la armadura de la máquina de CC? Coment sus efectos en la generación eléctrica y soluciones propuestas

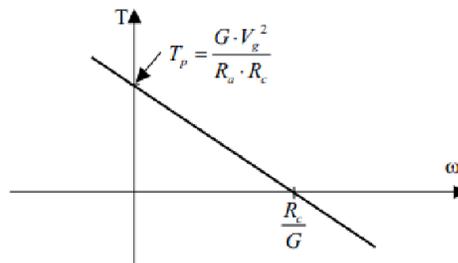
Solución:

La reacción de armadura es el campo magnético inducido en la armadura de la máquina de corriente continua debido al movimiento del rotor. Este campo inducido distorsiona el flujo magnético provocando desplazamiento del campo magnético neutro y causa el debilitamiento del campo original. Dentro de las posibles soluciones se encuentra: Desplazamiento de las escobillas, el uso de polos de conmutación y el uso de devanados de compensación

2. **Control Otoño 2024** El motor de CC en conexión shunt no debe utilizarse sin carga mecánica, porque existe el riesgo de embalamiento

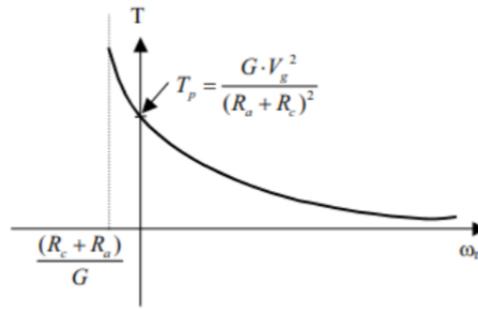
Solución:

Falso. Al igual que en caso de la máquina de C.C. conectada como generador, existen curvas que permiten explicar el comportamiento de los motores y estimar su desempeño de acuerdo a las distintas configuraciones de conexión. En este sentido una de las curvas características de los motores de C.C. más representativa es la curva de Torque -velocidad, representada en la siguiente figura para la conexión shunt



Curva Torque-velocidad de un motor shunt

Si la máquina está operando como motor y se aumenta la velocidad de giro, el torque generado comienza a disminuir hasta el punto en que se torna cero, si en este caso se sigue aumentando la velocidad entonces la corriente de armadura se invierte y la máquina comienza a operar como generador. Por ende, no ocurre el fenómeno de embalamiento, el cual si ocurre en los motores en serie



Curva Torque-velocidad de un motor en serie

3. **Control Otoño 2024** En una máquina de CC, el efecto de reacción de armadura se puede mitigar sobredimensionando el enrollado de campo

Solución:

Falso. Se han desarrollado varias técnicas para corregir parcial o totalmente el problema de reacción de armadura, entre los que destacan: desplazamiento de las escobillas, polos de conmutación, devanados de compensación, etc. Los devanados de compensación están conectados en serie con los devanados del rotor, por lo que cuando la carga en el rotor cambia, también cambia la corriente en los devanados de compensación.

Máquina Síncrona

Las máquinas síncronas son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje relacionada de manera proporcional con la frecuencia de las variables eléctricas. La idea de esta máquina es no considerar un sistema de conmutación como en las máquinas CC donde la frecuencia eléctrica ω es igual a la velocidad mecánica ω_m . Para un enrollado de estator de p polos, estas frecuencias están relacionadas por:

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_m \quad (10)$$

$$n_s = \frac{120}{p} f \quad (11)$$

Si además se utilizan 3 enrollados desplazados en el espacio 120° , se tendrá un generador síncrono trifásico.

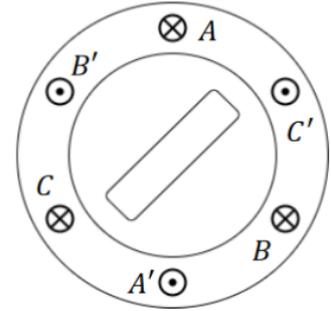


Figura 8: Generador síncrono trifásico

- El rotor, que proporciona el campo, puede ser un imán permanente. Sin embargo, en la práctica se prefiere emplear un devanado excitado con corriente continua (devanado de campo), alimentado a través de anillos rozantes desde una fuente de CC, que puede ser una batería u otra máquina eléctrica operando como generador, la cual se denomina **Excitatriz**.
- El campo magnético rotatorio (CMR) es el campo magnético resultante de la interacción de las fuerzas magnetomotrices de los 3 enrollados del estator de una máquina síncrona trifásica, cuando éstos son alimentados desde una fuente trifásica de voltaje de CA y se mueve a una velocidad de sincronismo w_s .
- Un motor síncrono en régimen permanente opera siempre a la misma velocidad cualquiera sea la carga en el eje.
- Δ Está relacionado con la carga del motor; mientras mayor carga, más grande será el valor de dicho ángulo.
- La velocidad mecánica del rotor n_m es igual a la velocidad sincrónica n_s (Que es la velocidad con la que gira el CMR) tenemos por otro lado que las variables **eléctricas** se relacionan con la velocidad sincrónica n_s mediante $n_s = \frac{120}{p} f$

Aspectos constructivos y modelo circuital

- El estator está compuesto por un paquete de láminas de acero, aisladas entre sí, con el propósito de reducir las pérdidas en el núcleo por corrientes parásitas
- Existen dos tipos de rotores con circuito de campo, siendo el rotor de polos salientes y el rotor cilíndrico

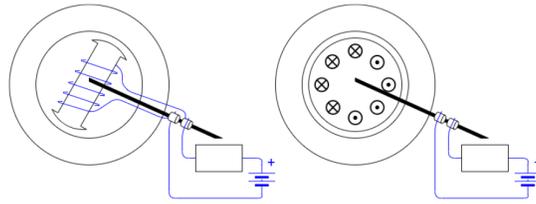


Figura 9: Rotor de polos salientes y rotor cilíndrico

- Dado que se requiere suministrar una corriente CC al circuito de campo del rotor, existen dos posibles formas:
 - Desde una fuente externa CC por medio de anillos rozantes y escobillas
 - Desde una fuente de potencia de CC especial montada directamente en el eje del generador síncrono
- Existen varios factores que ocasionan que E y V sean diferentes algunos de estos son:
 - Reaccion de armadura
 - Autoinductancia de las bobinas de la armadura
 - Resistencia de las bobinas de armadura
 - Efecto de la forma del rotor de polos salientes

Si se considera que $x_d = x_q = x_s$, siendo la última llamada reactancia síncrona, se tiene lo siguiente:

$$\text{Motor: } \hat{V} = jx_s\hat{I} + \hat{E} \quad (12)$$

$$\text{Generador: } \hat{E} = jx_s\hat{I} + \hat{V} \quad (13)$$

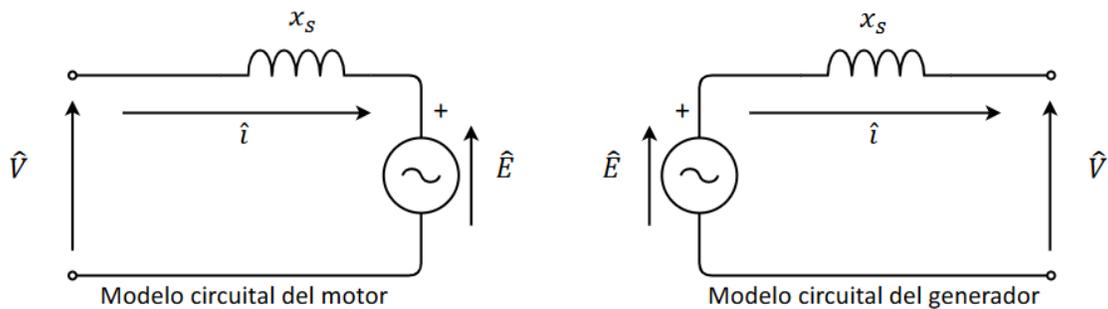
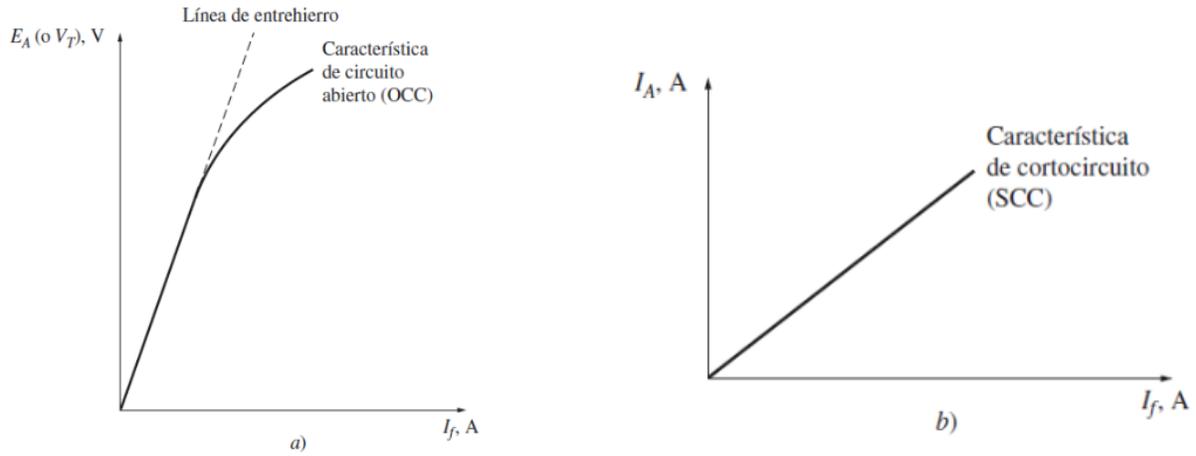


Figura 10: Modelo circuital de una máquina síncrona operando tanto como motor y generador, por lo general el término resistivo suele ser despreciable, por lo que a términos prácticos solo se considerará x_s

Para determinar de manera experimental la reactancia síncrona de una máquina síncrona de rotor cilíndrico se necesitan las curvas de excitación y cortocircuito, las cuales son:



(a) La **curva de excitación o de saturación en vacío** muestra la relación entre la tensión en bornes de la máquina (en vacío) y la corriente de excitación i_r del rotor. En condiciones de vacío (sin corriente de estator), la tensión en bornes es igual a la tensión interna, es decir, $\hat{E} = \hat{V}$ y esta relación $E = f(i_r)$ tiene una forma similar a la curva $B - H$ del núcleo, ya que la fem E es proporcional al flujo magnético.

(b) Se obtiene la curva de cortocircuito cortocircuitando los terminales del estator y aumentando la corriente de campo, asegurándose de no exceder el valor nominal de la corriente de armadura. En esta condición, la corriente de cortocircuito se retrasa casi 90° respecto a la fem debido a la predominancia de la reactancia sobre la resistencia en la impedancia sincrónica. La relación entre la fem y la corriente de excitación genera una característica lineal de cortocircuito que permite calcular la impedancia sincrónica en condiciones de saturación y sin saturación.

Figura 11: Curvas de excitación y cortocircuito.

En la figura, \overline{AB} representa el voltaje en vacío con la corriente de excitación i_{r1} , y \overline{AD} es la corriente de armadura obtenida con i_{r1} en cortocircuito. La impedancia sincrónica saturada queda dada por:

$$z_s = \frac{\overline{AB} [V]}{\overline{AD} [A]}$$

La impedancia sincrónica no saturada se expresa como:

$$z_s = \frac{\overline{AC} [V]}{\overline{AD} [A]}$$

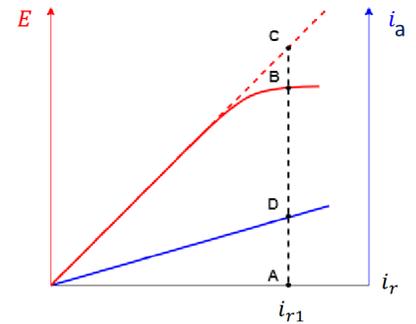


Figura 12: Curva de cortocircuito y excitación de una máquina síncrona

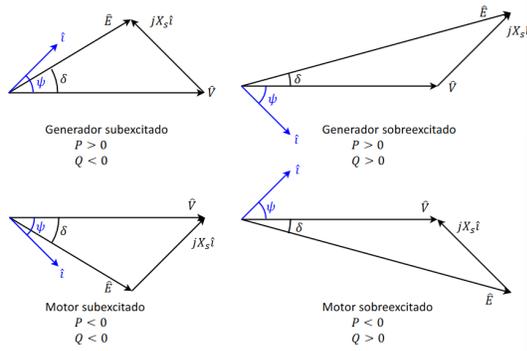
Analisis en estado estacionario

Las potencias monofasicas tanto en generador como en motor en los terminales de la maquina cuando se desprecia r_s y ademas se considera que $x_d = x_q = x_s$ seran:

$$P = \frac{VE}{x_s} \sin(\delta) \quad (14)$$

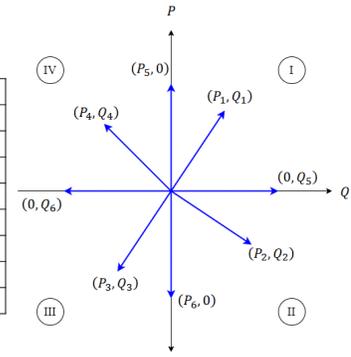
$$Q = \frac{V}{x_s} (E \cos(\delta) - V) \quad (15)$$

$$T = \frac{P}{\omega_s} = \frac{P}{4\pi f} 3P \quad (16)$$



(a) Diagramas fasoriales

Punto	Operación
(P_1, Q_1)	Generador sobreexcitado
(P_2, Q_2)	Motor sobreexcitado
(P_3, Q_3)	Motor subexcitado
(P_4, Q_4)	Generador subexcitado
$(0, Q_5)$	Condensador síncrono
$(0, Q_6)$	Reactor síncrono
$(P_5, 0)$	Generador unitario
$(P_6, 0)$	Motor unitario



(b) Diagramas fasoriales en el plano rectangular

Un generador síncrono puede verse como un sistema con dos variables de entrada o de control (Torque mecánico T_m y la corriente de excitación i_{r_s}) y cuatro variables de salida (las potencias activa P y reactiva Q , la tensión en bornes V y la frecuencia eléctrica f). Se pueden estudiar dos casos extremos de operación:

- En un **sistema de barra infinita** (es decir, un sistema muy grande comparado con el generador), la frecuencia y la tensión se mantienen constantes, sin importar el torque o la excitación aplicada a la máquina. Esto simplifica el control al desacoplar las variables de entrada y salida, ya que solo las potencias activa P y reactiva Q se ven afectadas. Normalmente, la potencia activa P se ajusta mediante el torque mecánico de entrada T_m a través del ángulo de carga δ , mientras que la potencia reactiva Q se controla variando la excitación i_r del generador.
- En el **modo de operación en isla**, el generador, donde alimenta únicamente una impedancia, no se observan variables constantes ni desacoples. Un aumento en el torque mecánico T_m provoca una aceleración del rotor, lo cual incrementa la frecuencia eléctrica y la tensión en bornes V . A su vez, un incremento en la corriente de excitación eleva E y V . En este modo de operación, cualquier aumento en V (y/o f) resultará en un incremento de las potencias activa P y reactiva Q .

Las cartas de operación se emplean para determinar gráficamente las condiciones de operación de un generador conectado a un sistema eléctrico comparativamente grande. Son curvas de igual excitación, calculadas para una frecuencia y una tensión constantes y dibujadas en un sistema de ejes cartesianos P-Q, en el cual se incluyen también los límites de la zona de operación:

- **Máxima y mínima potencia activa:** En un generador, $P \geq 0$, donde el límite inferior es determinado por razones de manejo del fuego en generadores térmicos de rotor cilíndrico, que fijan P_{\min} en torno al 30
- **Máxima corriente de armadura:** En las máquinas reales, la corriente de armadura tiene un valor máximo impuesto por el calentamiento del estator y la vida útil del aislamiento. Este límite establece una circunferencia con centro en el origen y radio V_{\max} . Por razones económicas, se opera con una combinación de P y Q , por lo que este límite es ligeramente superior al de la máxima potencia activa, es decir, $V_{\max} \geq P_{\max}$. En la intersección de ambos límites se alcanza el factor de potencia nominal. Este límite puede sobrepasarse brevemente ya que se relaciona con el calentamiento acumulado.
- **Máxima y mínima corriente de excitación:** Dado que existe un valor máximo para la corriente de excitación, impuesto por el calentamiento del rotor o las características de la excitatriz, se genera un límite para la operación del generador, representado por una circunferencia de centro V_{nom} y radio $\frac{V_{\max}}{X_s}$. Este límite es generalmente inferior al de la corriente de armadura solo para cargas inductivas pequeñas. En general, se estima una excitación mínima E_{\min} , generando así un límite de operación con centro $\left(\frac{V_{\text{nom}}^2}{X_s}, 0\right)$ y radio $\frac{V_{\text{nom}} \cdot E_{\min}}{X_s}$. Esto limita la potencia reactiva absorbida por el generador.

- Límite de estabilidad permanente:** Existe una limitación de operación en una máquina síncrona impuesta por la inestabilidad que ocurre al alcanzar un ángulo de carga $\delta = 90^\circ$ en máquinas de rotor cilíndrico. Este límite teórico se representa como una recta paralela al eje P , que pasa por el punto $\left(-\frac{V^2}{X_s}, 0\right)$, donde la potencia reactiva Q es negativa. Debido a que trabajar en este límite es poco aconsejable y difícil de controlar, se define un **límite práctico de estabilidad**, generalmente basado en experiencias de operación. Este límite práctico se representa como una recta que parte del punto $\left(-\frac{V^2}{X_s}, 0\right)$ y forma un ángulo de 70° con respecto al eje de la potencia reactiva Q .

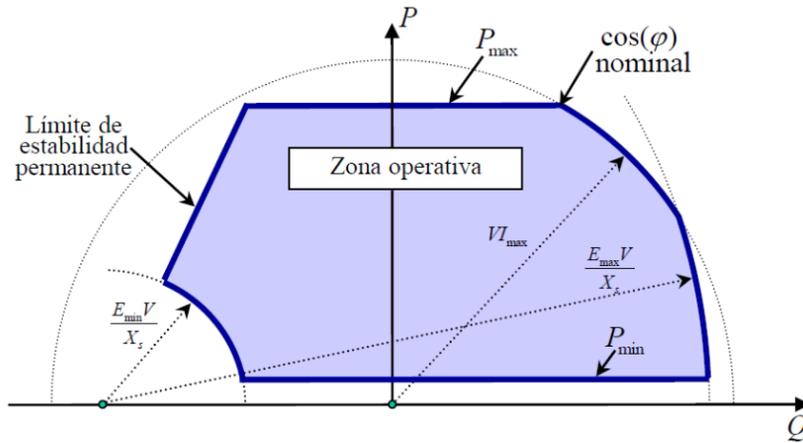


Figura 13: Ejemplo de carta de operación de un generador síncrono

Ejemplos: Preguntas de contenido Maquinas Sincronas

1. **(Control 2 Primavera 2023)** ¿Cuál es la desventaja del uso de escobillas para la alimentación del campo eléctrico de la máquina síncrona? Mencione una alternativa de alimentación del campo eléctrico que no requiera su uso.

Solución:

Las escobillas sufren de desgaste, por lo que las máquinas síncronas en las que el campo es alimentado mediante ellas, deben ser sometidas a mayor mantención.

Una alternativa de alimentación del campo eléctrico es el uso de un circuito excitador sin escobillas en el que se instala un bobinado menor en la armadura el cual induce una excitación trifásica en el rotor, la cual es rectificadora para alimentar el campo

2. **(Control 2 Primavera 2023)** Explique en qué consiste el campo magnético rotatorio de la máquina síncrona y cómo se genera. Utilice ecuaciones

Solución:

El campo magnético rotatorio (CMR) es el campo magnético resultante de la interacción de las fuerzas magnetomotrices de los 3 enrollados del estator cuando estos son alimentados desde una fuente trifásica de voltaje AC. Así se tiene que la fmm resultante es de magnitud constante y gira en el espacio a la velocidad de sincronismo.

Así se obtienen las siguientes ecuaciones para el CMR:

a) **Corriente estator**

$$i_a = I_m \cdot \cos(w_s \cdot t)$$

$$i_b = I_m \cdot \cos(w_s \cdot t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cdot \cos(w_s \cdot t - 240^\circ)$$

b) **FMM resultante**

$$F_a = N \cdot I_m \cdot \cos(w_s \cdot t)$$

$$F_b = N \cdot I_m \cdot \cos(w_s \cdot t - 120^\circ)$$

$$F_c = N \cdot I_m \cdot \cos(w_s \cdot t - 240^\circ)$$

c) **Proyección y z**

$$F_y = \frac{3}{2} \cdot N \cdot I_m \cdot \cos(w_s \cdot t) = \frac{3}{2} \cdot N \cdot I_m \cdot \cos(w_s \cdot t)$$

$$F_z = \frac{3}{2} \cdot N \cdot I_m \cdot \sin(w_s \cdot t)$$

3. **(Control 2 Otoño 2024)** La acción conjunta de los generadores síncronos en las centrales de generación eléctrica es la que principalmente fija la frecuencia eléctrica y tensión de la red, incluso en los puntos de consumo.

Solución:

Verdadero. En general en los SEP hay varios generadores operando en paralelo para suministrar la demanda de energía requerida por las cargas, siendo la frecuencia y la magnitud de la tensión en los SEP un resultado de la acción conjunta de todas las máquinas síncronas que se encuentran girando.

4. **(Control 2 Otoño 2024)** En la carta de operación de un generador sincrónico, la limitación de potencia aparente máxima viene dada por las capacidades de corriente y tensión de los enrollados de estado

Solución:

Verdadero. Aunque se asume la tensión en bornes y frecuencia constante para graficar la carta de operación. Existe una limitación en la carta de operación superior a la potencia máxima activa dada $P_{max} \leq V i_{max}$, la cual corresponde al radio de una circunferencia